

6.6kV급 선박용 고압 건식 변압기 최적 설계를 위한 전자계 해석

강문식, 김경호, 구성희, 조윤현
 동아대학교, KOC전기(주)

Electromagnetic Analysis of 6.6kV Main Transformer for a Vessel

Moon Shick Kang, Kyung Ho Kim, Sung Whi Ku, Yun Hyun Cho
 Dong-a University, KOC Electric

Abstract - This paper is described the insulation design and 3-D electromagnetic analysis of 6.6kV main transformer for a vessel by F.E.M.

To obtain the optimal design of insulation structure, the electric field stress is analyzed and estimated the proposed model A and B for the characteristics investigation according to the insulation thickness and position. And the performance characteristics of 6.6kV transformer are estimated as the equivalent circuit parameters computed by F.E.M. analysis.

1. 서론

최근에 선박 내 편의시설의 증가로 전력 사용량이 늘어남에 따라 선박에 탑재되는 주 변압기가 고전압, 대용량화되고 있는 추세이다. 지금까지 선박용 주 변압기는 3.3kV급 변압기를 사용하였다. 최근 3년 전부터 국내에서 건식 6.6kV급 변압기를 탑재할 수 있는 전장설계기술 개발을 착수하여 세계 최초로 사용을 하고 있으며, 일본 등 선진국에서는 점차 확대 보급되고 있다. 그러나 6.6kV 건식 주 변압기는 아직 초보적인 단계로서 일본 및 유럽의 세계적인 조선업체에서 아직 채용하지 않고 있으나, 향후 3.3kV급에서 6.6kV급으로의 적용을 위하여 연구가 활발히 진행 중에 있다.

따라서 본 논문에서는 6.6kV급 선박용 주 변압기를 설계하기 위한 절연계통설계, 부분방전에 의한 절연파괴의 분석기술 등의 설계 및 해석 기술을 향상시키기 위하여 6.6kV급 변압기를 modeling한 후 F.E.M.을 이용한 3차원적 자계 및 전계 해석을 하였다.

2. 본론

2.1 고압 건식 변압기의 자계 해석

변압기의 3차원 전자계 특성해석을 하기 위한 지배방정식은 Maxwell의 전자기방정식을 기초로 하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + d \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J} \quad (1)$$

연구에서 설계된 선박용 6.6kV 건식 변압기의 사양 Fig.1과 같다. Table 1의 변압기에서 변압기의 1차측은 6.6kV이며, 2차측 전압은 450V, 정격용량은 VA이다.

Table 1 Specifications of 6.6kV main transformer

Items	Primary	Secondary
Capacity / Connect	1700[kVA] / Dd0	
Phase / Frequency	3 phases / 60[Hz]	
Voltage (V)	R6600/6435/6270	450
Current (A)	148.7	2181.1
Current density (A/mm ²)	2.328	1.871
Number of turns	R279/272/265	19
Number of layer	6	3
Layer / Number of turns	3L(0/46.5)	3L(0/6.33)
Resistance (Ω)	0.640	0.002

선박용 6.6kV 고압 변압기의 3차원 전자계 해석을 하기 위한 해석모델 형상은 Fig. 1과 같다. Fig. 1의 해석 모델은 2차측 저압권선이 내측에 1차측 고압권선이 외측에 권선된 형태의 내철형 3상 변압기이다.

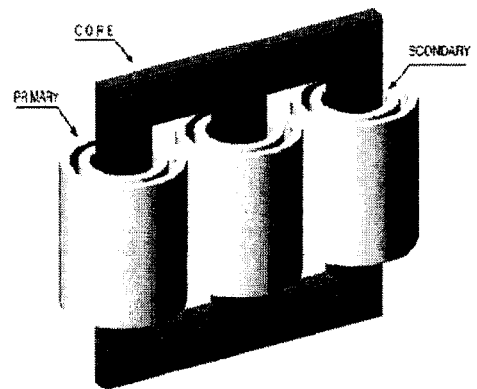
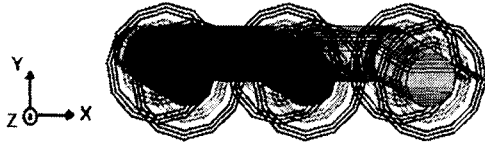


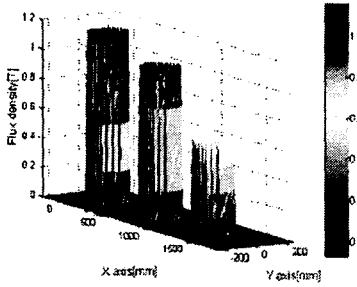
Fig. 1 Structure of 6.6kV transformer

Fig. 2(a)는 Fig. 1의 3차원구조를 1/2모델로 형상화하여 해석한 것이다. 3상 변압기의 인가 전원은 a상을 기준으로 b, c상은 120°의 상차각을 가진 3상 정현파 전압을 인가한 경우의 무부하시 자속분포를 나타낸다. 전류의 최대치는 a상에 순간 최대전류가 인가되며, b, c상은 a상의 1/2의 크기로 인가 전류방향의 반대방향으로 인가하였다.

Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에서 각철 부분을 횡단면으로 잘랐을 때 자속밀도 분포를 나타낸 것으로, a상에서는 1.2[T], b상에서 1[T], c상에서는 0.6[T]로 나타났다[2].



(a) Flux density distribution



(b) Magnitude of flux density

Fig. 2 Flux density analysis

Fig. 3은 자기등가회로의 구성도이며 전압, 전류에 대한 파라미터들을 나타냈고 회로정수는 실제의 값을 나타냈다.

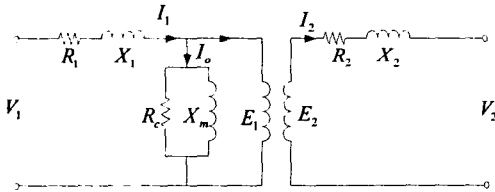


Fig. 3 Equivalent circuit of transformer

Table 2는 본 연구에서 설계, 제작된 6.6kV 선박용 3상 변압기에 대한 Fig. 3의 등가회로 파라미터이다.

Table 2 Parameters of transformer

Parameter	Unit	Value
Primary Resistance [R1]	[Ω]	0.64
Primary Leakage Inductance [L1]	[mH]	1.22
Secondary Resistance [R2]	[Ω]	0.002
Secondary Leakage Inductance [L2]	[mH]	0.96
Exciting Inductance [Lm]	[mH]	14.40

2.2 고압 건식 변압기의 전계 해석

전계강도의 세기는 변압기 단자를 통하여 나타나는 전압에 의존한다. 권선 내에서 발생하는 전계강도의 세기는 변압기 단자에 나타나는 전압과 전압 분포에 의해 결정된다. 변압기의 전압분포와 전계강도는 아래 지배방정식으로부터 구할 수 있다.

$$-\epsilon \nabla^2 V = \rho \quad (2)$$

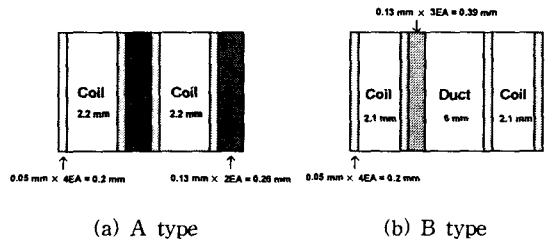
본 연구에 적용되는 선박용 고압 건식 변압기의 절연 형태는 H중 절연이기 때문에 NOMAX 절연지를 사용하였다. Modeling을 위한 절연 재료의 전기적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3 Insulation paper of Type 410 (NOMAX)

Thickness	mm	0.05	0.08	0.13
Break down voltage	kV/mm	18.1	22.3	25.1
Permittivity	60Hz	1.8	1.9	2.4
Dielectrics loss factor	60Hz	0.005	0.005	0.006
Surface resistivity	Ω/㎡	1×10 ¹⁷	1×10 ¹⁶	2×10 ¹⁶
Volume resistivity	Ω·cm	1×10 ¹⁶	2×10 ¹⁷	1×10 ¹⁷

변압기의 절연설계를 위해서는 먼저 코일사이의 절연구조에 대하여 파악하여야 한다. 본 논문에서는 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 코일 및 절연지의 위치를 modeling 한 후 변압기의 전계 분포를 해석하였다. 본 변압기의 절연은 실제 중량 및 크기를 줄이기 위하여 코일사이의 절연에 동 코일이 직접 감겨진 NOMAX PAPER 0.05mm 및 층 간 절연을 위한 0.13mm를 사용하였다.

형상은 전기적인 대칭구조로써 형상의 1/4만을 해석하였으며 2차원 평면형의 구조를 적용하였다. 인가하는 전압은 내전압 시험 시 인가전압으로써 20,000[V]를 가했다. 코일과 절연지의 구성 위치에 따라 절연 파괴강도가 달라지므로 이를 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 A type 과 B type으로 구분하여 modeling후 해석하였다[3].

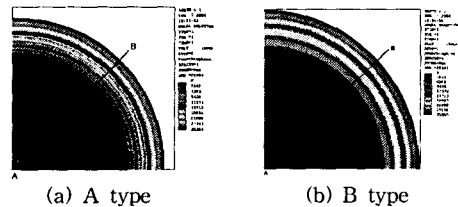


(a) A type

(b) B type

Fig. 4 Insulation structure of the primary coil

Fig. 5는 내전압 시험을 하였을 때 나타나는 전압의 분포를 1/4모델로 형상화 한 것이다.



(a) A type

(b) B type

Fig. 5 The test voltage distribution of transformer

Fig. 6은 전압을 인가한 후 위치에 따라 전계 해석을 한 결과로서 전계세기 분포도를 나타낸다. Fig. 7은 Fig. 6의 1차 축 권선 부분을 확대한 그림으로써 최고 전압이 A type은 약 11[kV/mm]가 B type은 약 1.6 [kV/mm]가 인가되는 것을 볼 수 있다.

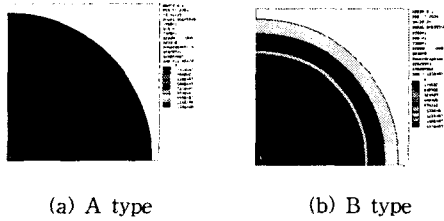


Fig. 6 Electric field distribution at the leg cross section

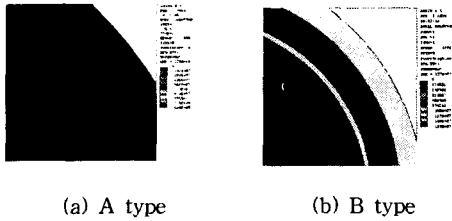
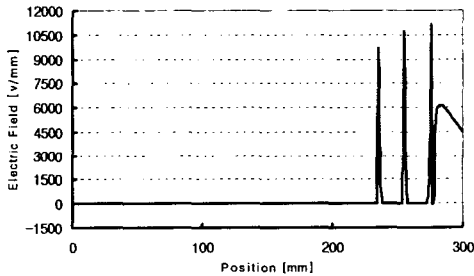
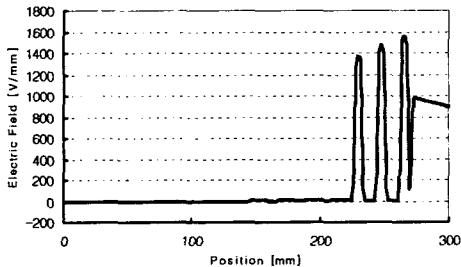


Fig. 7 The enlarged electric field distribution of Figure 6

Fig. 8은 A-B선상에서 전계세기의 곡선을 나타낸다.



(a) A type



(b) B type

Fig. 8 The electrical field stress on the line A-B

Table 4는 A type과 B type의 형상을 전계 해석했을 때 절연 파괴 강도를 나타낸다.

Table 4 Insulation breakdown voltage

Analysis Result	Breakdown voltage	
	0.05[mm] / Sheet	0.13 [mm] / Sheet
A Type 11 [kV/mm]	7.27 [kV/mm] / 8	13.1 [kV/mm] / 4
B Type 1.6 [kV/mm]	7.24 [kV/mm] / 8	9.87 [kV/mm] / 3

본 연구에서 A type과 B type 변압기의 절연구조는 Fig. 4와 같고 NOMAX지 0.05mm 와 0.13mm로 구성되어 있다. Table 4에 따라 인가된 전압이 11[kV/mm]일 때 NOMAX지 0.05mm 는 7.27[kV/mm]의 절연허용강도를 가진다. 마찬가지로 인가된 전압이 11[kV/mm]일 때 NOMAX지 0.13mm는 각각 13.1[kV/mm], 9.87[kV/mm]의 절연허용강도를 가진다. 따라서 A type에 비하여 B type이 인가전압에 대한 절연허용강도가 높음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 최근 선박 내 편의시설의 증가로 전력 사용량이 늘어남에 따라 선박에 탑재되는 주 변압기가 고전압, 대용량화 되고있는 추세에 맞추어 6.6[kV] 1000[kVA]급 선박용 고압 변압기를 개발하였다. 변압기의 특성해석을 고찰하여 형상을 설계한 후 6.6[kV]급 변압기의 전기적 특성을 시험 평가하였다. 그 결과 변압기 절연과 절연 파괴전압의 한계를 유한요소법을 적용한 전계 해석기술 확립으로 절연 이격 거리의 경감으로 인한 원가 절감을 가져 올 수 있었다.

이상으로 본 과제를 통하여 6.6[kV] 1000[kVA]급 선박용 고압 변압기의 설계, 해석 및 제작 기술을 확립하였다. 향후 시제품의 성능 확인시험을 통한 구매시방서(안)를 작성하여 절연특성 및 내 충격 특성이 우수한 선박용 변압기의 개발로 인해 선박의 전력공급에 안정화를 도모하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청 지원에 의해 수행한 연구 결과입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Abetti, P.A.(1953): Transformer models for the determination of transient voltage. Trans.,AIEE, 72, III, 468-480
- [2] Berry, R. N., Economics of high-voltage transmission, J. Inst. Electr. Eng., 94, Part II(1947)573
- [3] Power transformers. Part 3: Insulation levels and dielectric tests. IEC Publication 76-3. 1980.